



②① Aktenzeichen: P 41 26 100.3  
②② Anmeldetag: 7. 8. 91  
②③ Offenlegungstag: 18. 2. 93

⑦① Anmelder:

Technische Universität Chemnitz, O-9010 Chemnitz,  
DE

⑦② Erfinder:

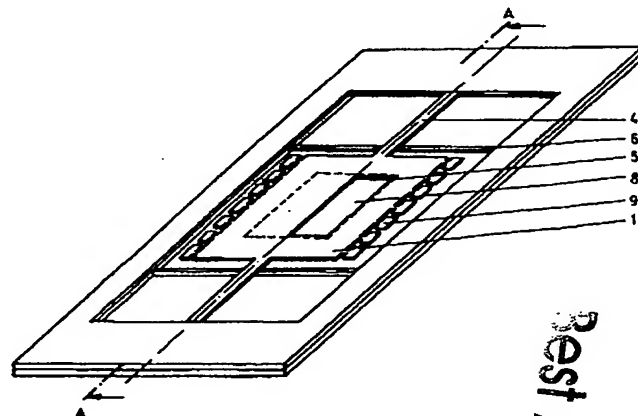
Schäfer, André, Dipl.-Ing., O-9051 Chemnitz, DE;  
Markert, Joachim, Dr.-Ing., O-9044 Chemnitz, DE;  
Rauch, Manfred, Prof. Dr.-Ing. habil., O-9081  
Chemnitz, DE; Breng, Uwe, Dipl.-Ing., O-9075  
Chemnitz, DE

⑤④ Mikromechanischer Drehbeschleunigungssensor

⑤⑦ Die Erfindung betrifft einen kapazitiv arbeitenden und nach mikromechanischer Fertigungstechnologie hergestellten Drehbeschleunigungssensor, der zur Umwandlung von auf ihn wirkenden Beschleunigungen in elektrische Signale dient. Anwendungsgebiete sind neben klassischen Anwendungen im Maschinenbau vor allem die Kraftfahrzeugtechnik und low-cost-Anwendungen in der Gerätetechnik oder in Haushaltgeräten.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen einfachen mikromechanischen Drehbeschleunigungssensor mit einer Differentialkondensatoranordnung zu schaffen, der bei Beschleunigungseinwirkung einer Richtung, aber beliebigen Richtungsinnes, eine Torsionsbewegung mit einer die dynamischen Eigenschaften günstig gestaltenden mechanischen Dämpfung und nur eine vernachlässigbar kleine Biegung zulässt.

Erfindungsgemäß wird das Drehpendel, welches aus Drehplatte (1) mit Elektrodenfläche (5) zwischen zwei Torsionsfederbändern (4) besteht, durch mindestens zwei Schneidenlager zusätzlich fixiert, wobei die Drehplatte (1) einen Durchbruch (8) besitzt, der dämpfungsmindernde Wirkung besitzt und gleichzeitig den Massenschwerpunkt verschiebt. Zusätzlich sind an der Drehplatte (1) eliminierbare Masselemente (9) vorgesehen.



Best Available Copy

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen kapazitiv arbeitenden und nach mikromechanischer Fertigungstechnologie hergestellten Drehbeschleunigungssensor, der zur Umwandlung von auf ihn wirkenden Beschleunigungen in elektrische Signale dient. Er ist überall dort anwendbar, wo Beschleunigungen an Geräten und Anlagen ermittelt und daraus Steuerfunktionen abgeleitet werden müssen.

Beschleunigungssensoren eignen sich zur Bewegungsanalyse in vielen Bereichen. Mikromechanisch hergestellte Sensoren besitzen den Vorteil kleiner Abmessungen und, bei entsprechender Stückzahl, niedriger Kosten. Anwendungsgebiete sind somit neben klassischen Anwendungen im Maschinenbau vor allem die Kraftfahrzeugtechnik und low-cost-Anwendungen in der Gerätetechnik oder in Haushaltsgeräten.

In GB 21 01 336 A wird ein mikromechanischer kraftkompensierter Beschleunigungssensor vorgeschlagen, der mit kapazitiver Signalwandlung arbeitet. Die dazu verwendete Differentialkondensatoranordnung wird realisiert, indem an Ober- und Unterseite eines um die seitliche Achse bewegbaren Torsionskörpers jeweils eine Elektrode angebracht ist. Diesen Elektroden steht jeweils eine feste, mit dem Rahmen verbundene, Elektrode (ober- oder unterhalb des Torsionskörpers) gegenüber.

Eine Weiterentwicklung der Anordnung stellt DE 38 24 695 dar, welche beide bewegliche Elektroden unterhalb des Torsionskörpers anordnet, indem dieser als Drehpendel ausgebildet wird. Eine solche Anordnung ist zwar technologisch einfach herstellbar und die Elektrodenabstände der beiden Teilkapazitäten des Differentialkondensators entstehen im gleichen Prozeßschritt, aber infolge der bei Beschleunigungseinwirkung neben der Torsion auftretenden erheblichen Biegung der Torsionsachse in ihrer gesamten Länge erfolgt die gegensinnige Abstandsänderung der Elektroden nicht um den gleichen Betrag. Es handelt sich also um keinen echten Differentialkondensator. Über den für die Biegesteifigkeit wichtigen Querschnitt der Torsionsfederbänder wurden keine Aussagen gemacht. Das angegebene Ausführungsbeispiel gibt einen extrem flachen Querschnitt an, wodurch eine besonders hohe Empfindlichkeit gegenüber Biegung entsteht, welche die bereits genannten Probleme hervorruft. Die im Ausführungsbeispiel gewählte Realisierungsvariante mit Zusatzmasse erlaubt zwar eine Variation der Torsionskörperdicke, erfordert aber den relativ aufwendigen Prozeßschritt Epitaxie.

In EP 00 40 302 wird ein Torsionsaktor zur Strahlablenkung beschrieben, der ebenfalls als Drehpendel ausgebildet ist. Der Abstand Drehpendel zu den festen Elektroden der Grundplatte wird durch eine Unterstützungsfläche unterhalb der Torsionsachse fixiert. Als Ausführungsbeispiel sind mehrere lange, schmale, durch Ätzen der Grundplatte entstandene Unterstützungsflächen angegeben, die hintereinander in der Torsionsachse liegen. Über die genaue Gestaltung der Unterstützungsflächen wurden keine Angaben gemacht. Die beim Torsionsaktor ebenfalls auftretende Biegung in der Torsionsachse — hier infolge der Kraft des elektrischen Feldes — und der damit auftretende Strahlablenkfehler — werden durch die Anordnung zwar verhindert, aber für die Justage von Grundplatte und Drehpendel quer zur Torsionsachse stehen enge Forderungen, die die Montage verkomplizieren.

Für kapazitive Bewegungssensoren werden mit zunehmender Miniaturisierung die Fragen der Luftdämpfung immer wichtiger. Um eine hohe Empfindlichkeit des Sensors zu erhalten, müssen die Elektrodengrundabstände möglichst gering sein, damit die durch die Bewegung hervorgerufene Änderung des Elektrodenabstandes zu einer großen Kapazitätsänderung führt. Für den elektrostatisch rückgekoppelten Sensor geht der Elektrodenabstand quadratisch in die erzeugbare Rückstellkraft ein. Für die häufig auftretende Überdämpfung und die damit verbundenen ungünstigen dynamischen Eigenschaften gibt es verschiedene Abhilfen.

In der Zeitschrift Sensors & Actuators 4 (1984) S. 191 wird eine Evakuierung des Sensors als mögliche Lösung angegeben. Diese Methode ist jedoch technologisch aufwendig und oft kann die Dichtheit des Sensors nur über einen bestimmten Zeitraum gewährleistet werden.

Auf der Fachtagung EUROSensors IV 1990 P.2.1.1. wurde ein mikromechanischer Beschleunigungssensor vorgestellt, der der Überdämpfung mit Schlitzten in der seismischen Masse beikommt. Die Schlitzte erstrecken sich über die gesamte Plattenoberfläche, parallel zur einseitigen Aufhängung des Paddels. Wenn so auch eine wirksame Entdämpfung erfolgt, so verringert sich die Kapazitätsänderung etwa um den Betrag, der durch die Schlitzung von der Gesamtoberfläche der Elektrode abgeht, also beträchtlich.

Beim Drehpendel nach DE 38 24 695 sind die beiden Teilkapazitäten des Differentialkondensators nebeneinander angeordnet, wodurch das für die Dämpfung wichtige Verhältnis Elektrodenabstand zu Elektrodenfläche besonders klein wird. Der Sachverhalt wird etwas dadurch abgeschwächt, daß die Abstandsverringerung des einen Drehplattenflügels notwendigerweise mit einer Abstandsvergrößerung des anderen Drehplattenflügels verbunden ist. Das Patent sieht keine Möglichkeit zur Verringerung der Dämpfung vor.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen einfachen mikromechanischen Drehbeschleunigungssensor mit einer Differentialkondensatoranordnung zu schaffen, der bei Beschleunigungseinwirkung einer Richtung, aber beliebigen Richtungssinnes, eine Torsionsbewegung mit einer die dynamischen Eigenschaften günstig gestaltenden mechanischen Dämpfung und nur eine vernachlässigbar kleine Biegung zuläßt.

Diese Aufgabe wird bei einer gattungsgemäßen Vorrichtung durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

Bei dem erfindungsgemäßen Drehbeschleunigungssensor ist der Torsionskörper als Drehpendel (Drehplatte mit zwei Drehplattenflügeln zwischen zwei Torsionsfederbändern) ausgebildet. Neben der festen Einspannung der Torsionsfederbänder wurde die Drehplatte durch zwei oder mehr, zum Beispiel vier Schneidenlager, wobei das Schneidenlager aus einer an der Unter- oder Oberseite der Torsionsfederbänder ausgebildeten Schneide und der als Pfanne dienenden Rippen besteht, in ihrer vertikalen (und in einem bestimmten Maße horizontalen) Lage fixiert, so daß praktisch nur noch ein Freiheitsgrad verbleibt. Die Durchbiegung wird zusätzlich durch den für die Torsionsfederbänder gewählten Dreiecks- und Rhombusquerschnitt vermindert.

Der erste Abschnitt des kennzeichnenden Teils des Hauptanspruchs bezieht sich auf eine Anordnung mit zwei

— je Torsionsfederband einem — Schneidenlagern, wobei zur Lösung der erfindungsgemäßen Aufgabe eine elektrische Spannung zwischen den Elektrodenflächen, mit der daraus erwachsenden Anziehungskraft, notwendig ist. Es bietet sich für den erfindungsgemäßen Drehbeschleunigungssensor an, die Lösung mittels elektrostatischer Kraftkompensation mit einer der Kompensationsspannung überlagerten Vorspannung, die ständig die Anziehung gewährleistet (siehe z. B. technisches messen 56(1989) Heft 2, S. 93—98) herbeizuführen. Durch die gewählte Anordnung sind Justage und Montage denkbar einfach. 5

Der zweite Abschnitt des kennzeichnenden Teils des Hauptanspruchs bezieht sich auf eine Anordnung mit vier — je Torsionsfederband zwei — Schneidenlagern, die eine vollständige vertikale Fixierung der Torsionsfederbänder auch ohne anliegende elektrische Spannung ermöglicht, wenn man eine ideale Anordnung der Schneidenlager voraussetzt. Dies wird in der Praxis nicht möglich sein. Jedoch kann man die Pfannen jedes Torsionsfederbandes horizontal versetzt anordnen, womit auch die Schneidenlager zueinander versetzt angeordnet sind. Damit vergrößert sich die vertikale Toleranz bei der Montage von Mittel- und Deckplatte. Kann nämlich eine geringe Verbiegung innerhalb des Torsionsfederbandes infolge "klemmender Lagerung" erfolgen, ohne daß es zur Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Gesamtsystems kommt, so kann jegliches vertikale Spiel an den Lagerpunkten ausgeschlossen werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit, durch eine forcierte stärkere Verbiegung des Torsionsfederbandes bewußt die mechanischen Eigenschaften des Gesamtsystems zu verändern. 10 15

Die Torsionsbewegung infolge Beschleunigungseinwirkung wird mittels einer Differentialkondensatoranordnung, wie sie in Sensors & Actuators A21—A23 (1990), S. 297—302 oder elektrostatisch kraftkompensiert, wie sie in technisches messen 56(1989)2, S. 93—98 beschrieben ist, ausgewertet. Durch die Einschränkung der Biegung kommt es zu einer Genauigkeitserhöhung des Meßsignals. 20

Vorteilhafte Weiterentwicklungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen dargestellt.

Anspruch 2 schlägt zum Zwecke der Verringerung der mechanischen Dämpfung vor, einen oder mehrere Durchbrüche in die Drehplatte in einem Gebiet in und um die gelagerte Torsionsachse anzubringen. Die dadurch verlorene Elektrodenfläche liegt in einem Gebiet, wo bei Beschleunigungseinwirkung nur eine kleine oder in der gelagerten Torsionsachse sogar Null betragende Kapazitätsänderung entstanden wäre. Die verbleibende Elektrodenfläche befindet sich in größerem Abstand von der gelagerten Torsionsachse, wo auch nach der dämpfungsmindernden Maßnahme ein Großteil der Kapazitätsänderung (Meßsignal) verbleibt. Die die Dämpfung bestimmende erhebliche Luftreibung entsteht jedoch nur noch unter einem der Drehplattenflügel. 25

Die Erfindung verbindet die dämpfungsmindernde Maßnahme nach Anspruch 2 mit der für die Funktion des Beschleunigungssensors notwendigen Verschiebung des Massenschwerpunktes. Dabei werden ein oder mehrere Durchbrüche asymmetrisch bezüglich der gelagerten Torsionsachse in die Drehplatte eingebracht. Die größte Verschiebung des Massenschwerpunktes wird erreicht, wenn sich der oder die Durchbrüche nur einseitig von der gelagerten Torsionsachse beginnend in einem Drehplattenflügel erstrecken. 30

Anspruch 3 bezieht sich auf eine bei der Montage wählbare Lage der Pfannen der Schneidenlager, Anspruch 4 auf eine während des Betriebes willkürliche Einstellbarkeit der vertikalen Lage der Pfannen. Somit lassen sich neue, willkürlich wählbare einstellbare Eigenschaften erzielen. Die verschiedenen Lagemöglichkeiten verdeutlicht Tab. 1. 35

Ausführungsbeispiele des mikromechanischen Drehbeschleunigungssensors sind in den Zeichnungen dargestellt. Es zeigen 40

Fig. 1 Gesamtansicht des Drehbeschleunigungssensors (ohne Deckplatte),

Fig. 2a Längsschnitt A-A durch den Drehbeschleunigungssensor ohne Deckplatte und mit zwei Schneidenlagern,

Fig. 2b Längsschnitt B-B durch den Drehbeschleunigungssensor mit Deckplatte und mit vier Schneidenlagern,

Fig. 3a—c Querschnitte der Torsionsfederbänder des Drehbeschleunigungssensors, 45

Fig. 4 Gestaltung von Mittel- und Deckplatte zur Realisierung der Wählbarkeit der vertikalen Lage der Schneidenlager,

Fig. 5 Maskenlayout für Drehpendel mit eliminierbaren Masseelementen,

Fig. 6 Maskenlayout für Drehpendel mit strukturiertem Drehplattenflügel (Ausschnitt).

Der Torsionskörper — das Drehpendel (bestehend aus der Drehplatte 1, die sich in zwei Drehplattenflügel 2 und 3 aufteilt, aufgehängt zwischen zwei Torsionsfederbändern 4) — ist in einen Siliciumchip geätzt, der die Mittelplatte 12 bildet. Die Deckplatte 13 — sofern vorhanden — ist ebenfalls aus Silicium, während die Grundplatte 11 aus Glas oder Silicium hergestellt werden kann. Für die Realisierung des Querschnittes der Torsionsfederbänder 4 bestehen Einschränkungen durch Anwendung von Verfahren der Siliciummikrosystemtechnik. So entstehen durch anisotropes Ätzen (111)-Flächen, die mit der Waferoberfläche im charakteristischen Winkel von 54,74° stehen, womit das Höhen-Breiten-Verhältnis für den Dreiecks- und Rhombusquerschnitt festgelegt ist (Fig. 3a, 3b). Die genannten Querschnitte sind anzustrebene Idealformen, die durch die Maskentechnik und die daraus resultierende Mindestbreite des Stegs einer Maske nicht völlig erreicht werden können. Es verbleibt eine zur Waferoberfläche parallele Fläche 16. Der Dreiecksquerschnitt kann zum V-Querschnitt nach Fig. 3c reduziert werden. Damit ändern sich Torsions- und Biegeverhalten. 50 55 60

Der Durchbruch 8 in der Drehplatte 1 ist in Fig. 1 einseitig von der gelagerten Torsionsachse in nur einen Drehplattenflügel eingebracht. Damit läßt sich die größte Verschiebung des Massenschwerpunktes erreichen. Da dies jedoch für die notwendige Symmetrie der Elektrodenflächen 5 auf beiden Drehplattenflügeln 2 und 3 zur größten Elektrodenflächenreduzierung führt, kann ein Kompromiß angebracht sein. Dieser Kompromiß wird gefunden, indem der Durchbruch 8 sich immer noch asymmetrisch zur gelagerten Torsionsachse befindet, aber sich trotzdem über beide Drehplattenflügel 2 und 3 erstreckt. Damit verringert sich zwar die Verschiebung des Massenschwerpunktes, aber die Elektrodenfläche 5 vergrößert sich. 65

In Fig. 4 sind zum einen Grundplatte 11, Mittelplatte 12 und zum anderen Deckplatte 13 vor dem Zusammen-

bau dargestellt. Die Anordnung zeigt die Rippen 6 in der Grundplatte 11 und die Rippen 7 in der Deckplatte 13 zur Realisierung von vier Schneidenlagern. Die Randzone der Mittelplatte 12 besitzt großflächige Vertiefungen 14 und die der Deckplatte 13 Erhöhungen 15, deren Tiefe bzw. Höhe über die in den zwei Einbaulagen (Fig. 4) möglichen zwei diskreten vertikalen Pfannenlagen entscheidet. Die Anordnung läßt sich mit den in Anspruch 4 vorgeschlagenen Schwellkörpern kombinieren. Ebenso ist nur eine Ausführung der Rippen 7 in der Deckplatte 13 als Schwellkörper denkbar, ohne daß die in Anspruch 3 beschriebene Anordnung verwendet wird.

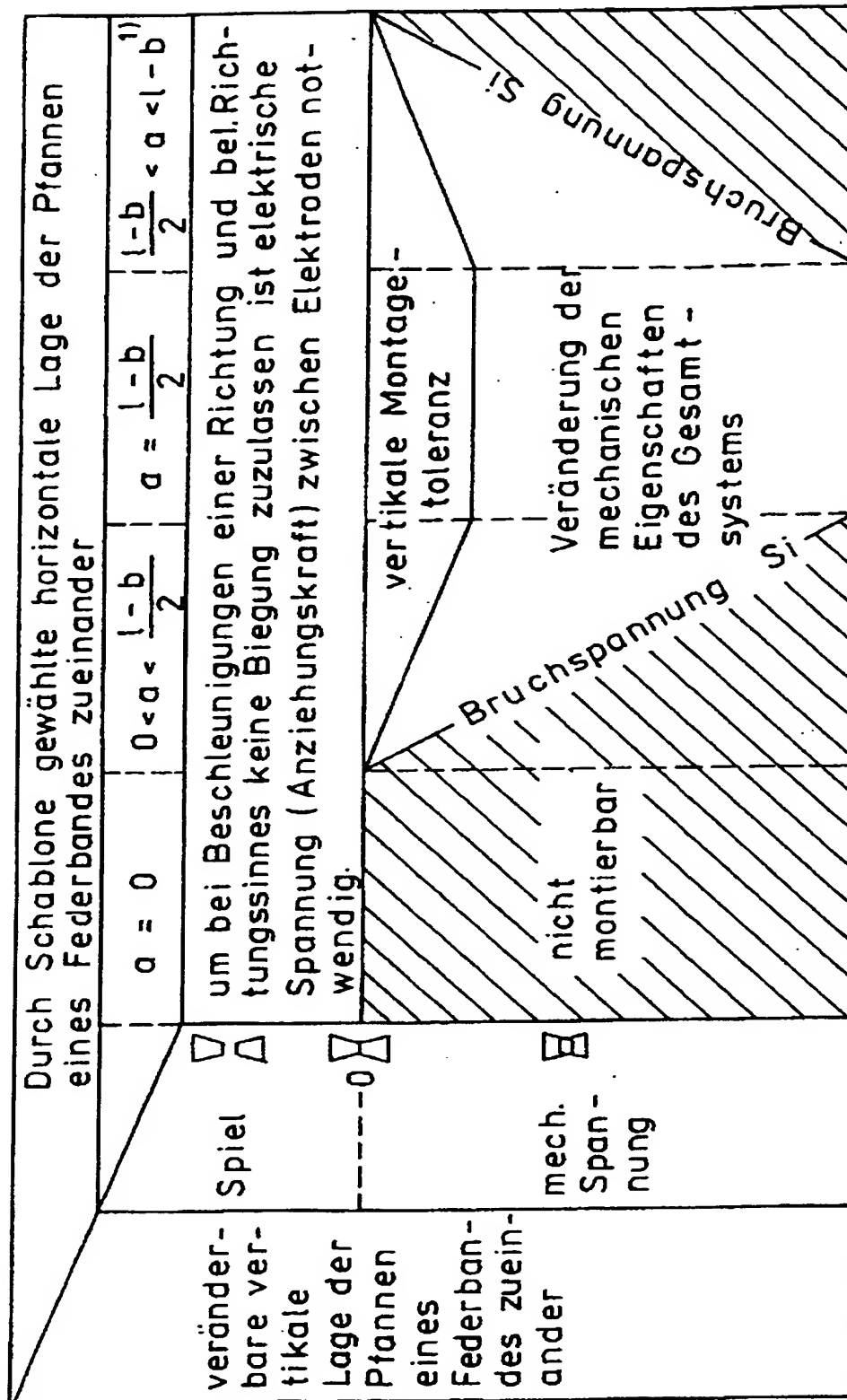
Durch gezielte Eliminierung der Masselemente 9 (Fig. 5) in beliebiger Kombination läßt sich der Massenschwerpunkt in entsprechender Stufung in einem großem Bereich einstellen. Die Eliminierung könnte zum Beispiel mittels Laser oder mechanisch erfolgen.

Die quadratischen Gruben 10 in der Drehplatte 1 (Fig. 6) beruhen auf Selbststopp. Sie lassen die auf der Rückseite liegende Elektrode unversehrt. Die maximale Kantenlänge der quadratischen Gruben 10 hängt von der Dicke der Drehplatte 1, der notwendigen Restdicke im Grubenboden und der notwendigen Stegbreite der Masken ab.

Beliebige Kombinationen der einzelnen Maßnahmen zur Verschiebung des Massenschwerpunktes sind möglich.

#### Aufstellung der verwendeten Bezugszeichen

- 1 Drehplatte
- 2 Drehplattenflügel
- 3 Drehplattenflügel
- 4 Torsionsfederband
- 5 Elektrodenflächen
- 6 Rippe in der Grundplatte
- 7 Rippe in der Deckplatte
- 8 Durchbruch
- 9 Masselemente
- 10 Grube
- 11 Grundplatte
- 12 Mittelplatte
- 13 Deckplatte
- 14 großflächige Vertiefungen
- 15 Erhöhungen
- 16 parallele Fläche zur Waferoberfläche



1) Verwendete Formelzeichen siehe Fig. 2 b

Tab. 1

#### Patentansprüche

1. Mikromechanischer Drehbeschleunigungssensor in Sandwichbauweise mit einem in die Silicium-Mittelplatte strukturierten Drehpendel, bestehend aus gleich großen, bezüglich der Torsionsachse symmetrischen Elektrodenflächen, die auf der Drehplatte angebracht sind und aus feststehenden Gegenelektroden auf einer Grundplatte, die mit der Mittelplatte und, sofern vorhanden, der Deckplatte fest verbunden ist, wobei eine Kraftkompensation für die Elektroden der Differentialkondensatoranordnung möglich ist und die

Torsionsachse weit außerhalb des Masseschwerpunktes, aber innerhalb des Torsionskörpers verläuft, dadurch gekennzeichnet,

daß das Drehpendel, welches aus der Drehplatte (1) mit 2 Drehplattenflügeln (2, 3) zwischen zwei Torsionsfederbändern (4) besteht, in der Achse von Einspannung zu Einspannung durch mindestens 2 Schneidenlager gelagert ist, wobei unterhalb jedes der beiden Torsionsfederbänder (4) ein erstes Schneidenlager

möglichst nahe beidseitig symmetrisch zur Drehplatte (1) angeordnet ist, und die Schneidenlager aus den Rippen (6) auf der Grundplatte (11) und den Torsionsfederbändern (4) gebildet werden, wobei der Querschnitt der Torsionsfederbänder (4) der Form eines Dreiecks möglichst nahekommt,

und daß zwischen den Elektroden der Drehplattenflügel und ihren Gegenelektroden eine permanente elektrische Spannung anliegt oder

daß das Drehpendel in der Achse von Einspannung zu Einspannung durch mindestens vier Schneidenlager gelagert ist, wobei unterhalb und oberhalb der Torsionsfederbänder (4) jeweils beidseitig symmetrisch zur Drehplatte (1) mindestens ein Schneidenlager angeordnet ist und der Querschnitt der Torsionsfederbänder (4) einem Rhombus nahe kommt, wobei die ersten Schneidenlager möglichst nahe der Drehplatte (1) angeordnet sind, und aus den Rippen (6) in der Grundplatte (11) und den Torsionsfederbändern (4) gebildet werden

und die zweiten Schneidenlager aus den Rippen (7) in der Deckplatte (13) und den Torsionsfederbändern (4) gebildet werden, wobei die Rippe (6) in der Grundplatte (11) und die Rippe (7) in der Deckplatte (13) zueinander versetzt oder gegenüberstehen- angeordnet sind.

2. Mikromechanischer Drehbeschleunigungssensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Drehplatte (1) zum Zwecke der Reduzierung der mechanischen Dämpfung in ihrem Inneren in einem Gebiet in und um die gelagerte Torsionsachse, mindestens einen Durchbruch (8) besitzt, wobei der Durchbruch (8) zum Zwecke der Verschiebung des Massenschwerpunktes asymmetrisch bezüglich der gelagerten Torsionsachse eingebracht ist.

3. Mikromechanischer Drehbeschleunigungssensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zum Zwecke der Verstellbarkeit der Schneidenlager, welche aus Rippe (7) in der Deckplatte (13) und Torsionsfederband (4) gebildet werden, die Mittelplatte (12) in ihrer Randzone Flächen unterschiedlicher Höhe besitzt, die als großflächige Vertiefungen (14) ausgebildet sind, und

daß die Deckplatte (13) in ihrer Randzone entsprechende erhöhte Flächen (15) besitzt und die mit den in Größe und Lage entsprechenden großflächigen Vertiefungen (14) in der Mittelplatte (12) mit den erhöhten Flächen (15) in der Deckplatte (13) kombiniert und an den Kontaktstellen verbunden sind oder

daß die Deckplatte (13) in der Waferebene um 180° zur Mittelplatte (12) gedreht angeordnet ist.

4. Mikromechanischer Drehbeschleunigungssensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zum Zwecke der Verstellbarkeit während des Betriebes, ein thermischer oder nach einem anderen Prinzip arbeitender Schwellkörper in der Deckplatte (13) oder Grundplatte (11) vorhanden ist, wobei vorzugsweise die Rippe (7) in der Deckplatte (13) als Schwellkörper ausgebildet ist.

5. Mikromechanischer Drehbeschleunigungssensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß am Rand der Drehplatte (1), vorzugsweise symmetrisch zur gelagerten Torsionsachse, Masseelemente (9) gleicher oder unterschiedlicher Größe angeordnet sind, die zum Zwecke der Verschiebung des Massenschwerpunktes der Drehplatte (1) vorrangig einseitig eliminiert werden.

6. Mikromechanischer Drehbeschleunigungssensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zum Zwecke der Verschiebung des Masseschwerpunktes in mindestens einem der Drehplattenflügel (2, 3) ein Stoff von zu Silicium unterschiedlicher Dichte ein- oder aufgebracht ist.

7. Mikromechanischer Drehbeschleunigungssensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zum Zwecke der Verschiebung des Massenschwerpunktes ein Drehplattenflügel eine Strukturierung in Form von mehreren, in einem bestimmten Muster angeordneten, Gruben (10) besitzt, wobei diese Strukturierung vorzugsweise in Form von zueinander versetzt angeordneten Gruben (10) quadratischen Grundrisses eingeschlossen von größeren, wiederum quadratischen, nicht strukturierten Bereichen, die zum Zwecke der mechanischen Stabilisierung dienen, ausgebildet ist.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

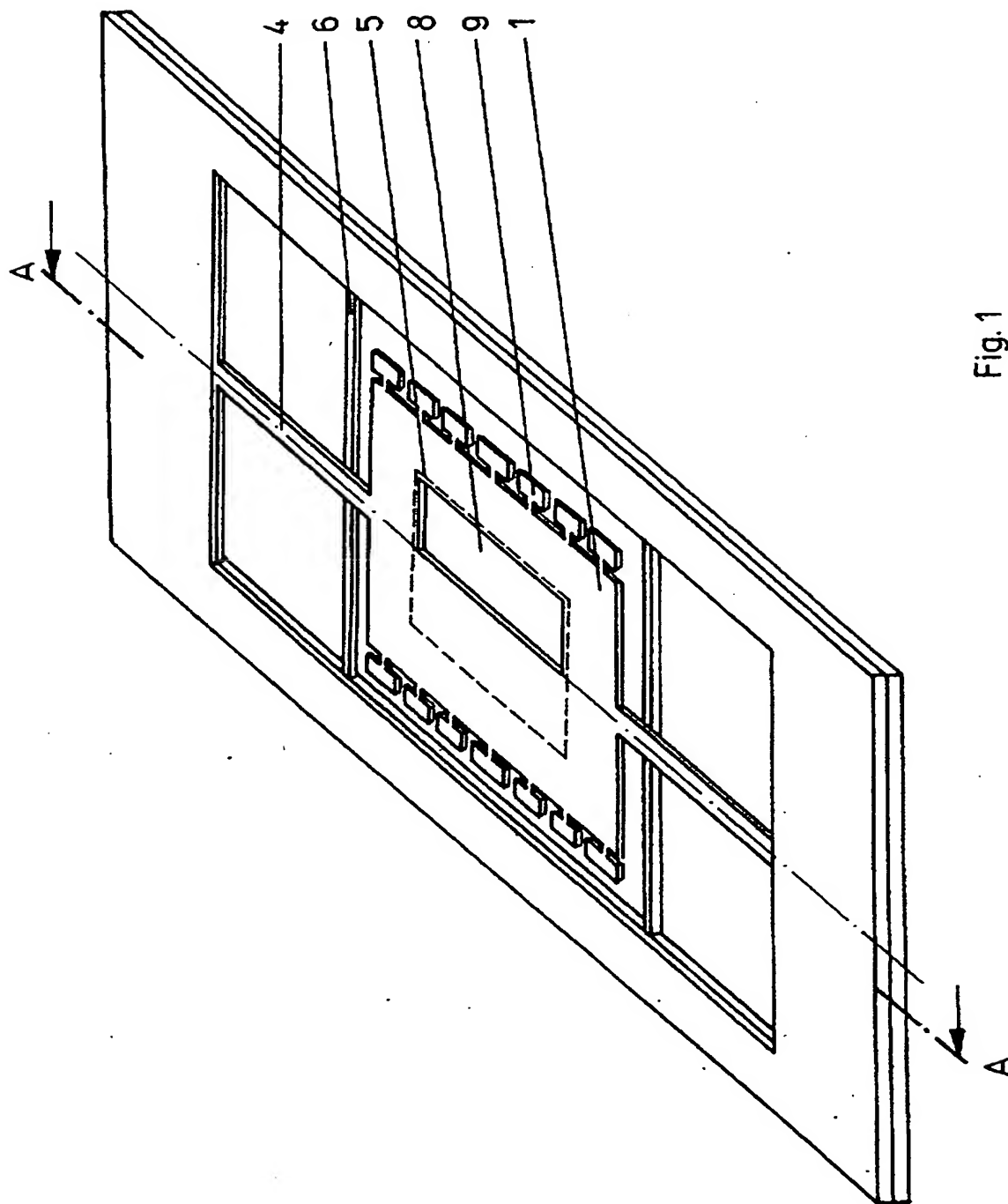


Fig. 1

Fig. 2a

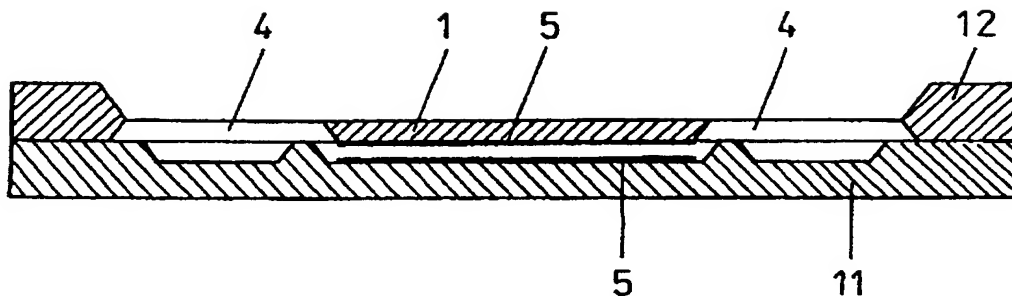


Fig. 2 b

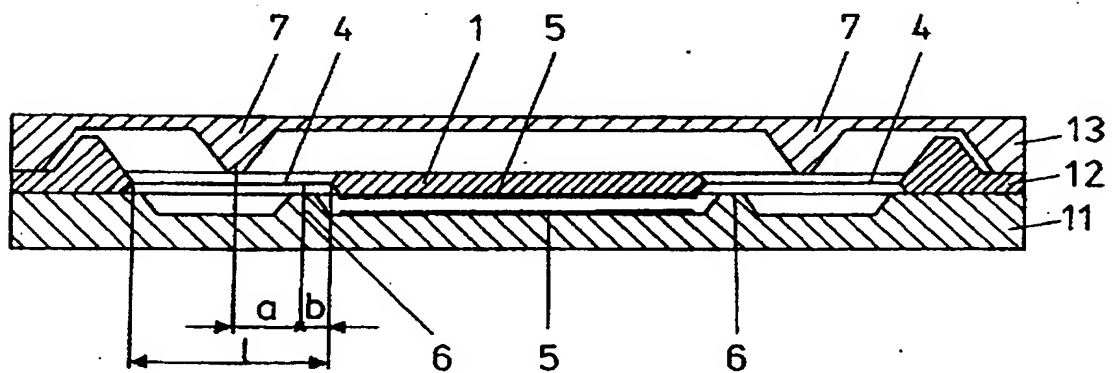


Fig 3a

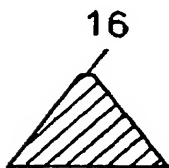


Fig. 3b

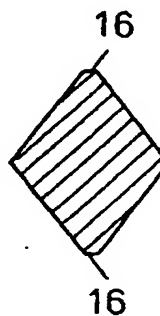
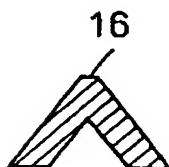


Fig. 3c





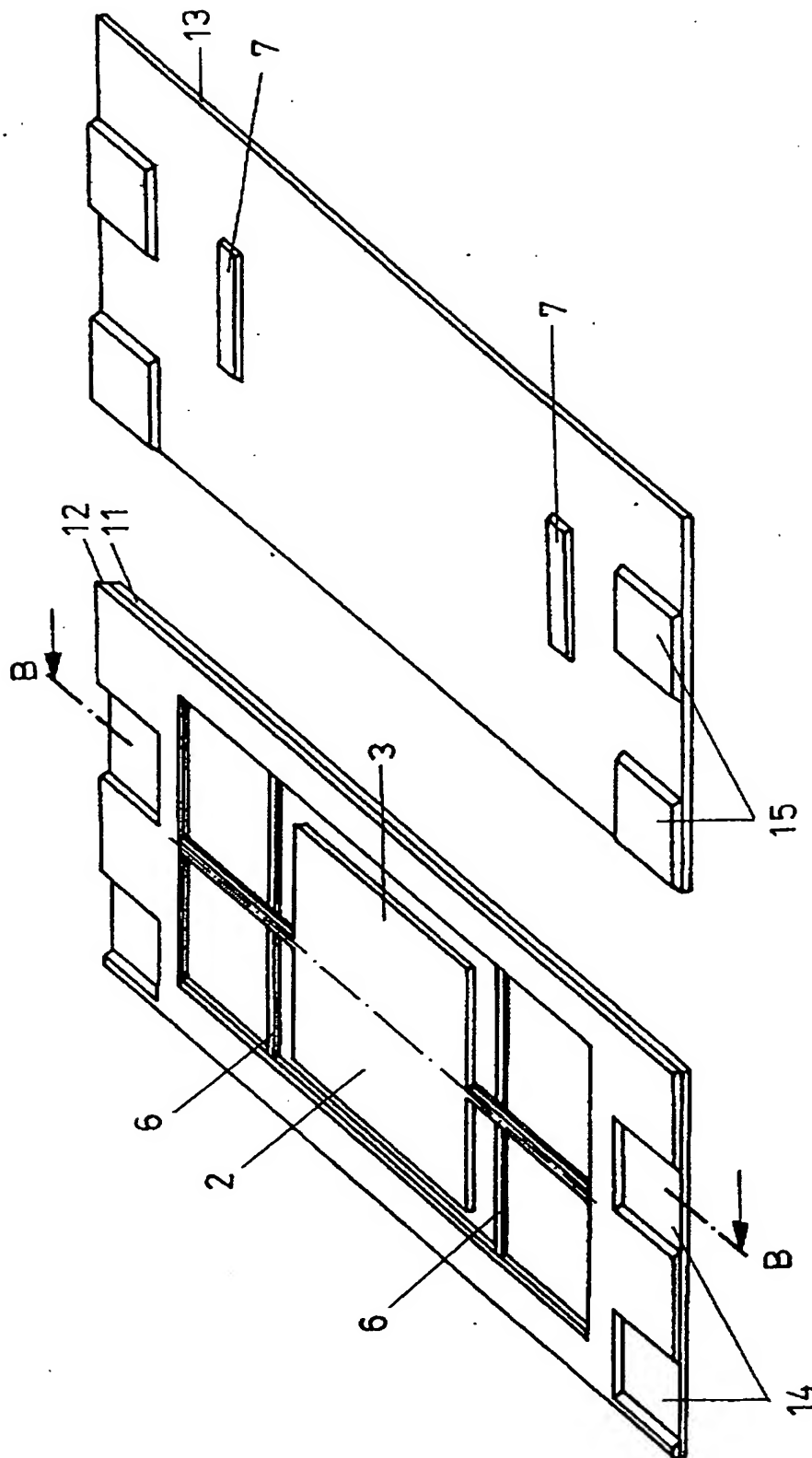


Fig. 4

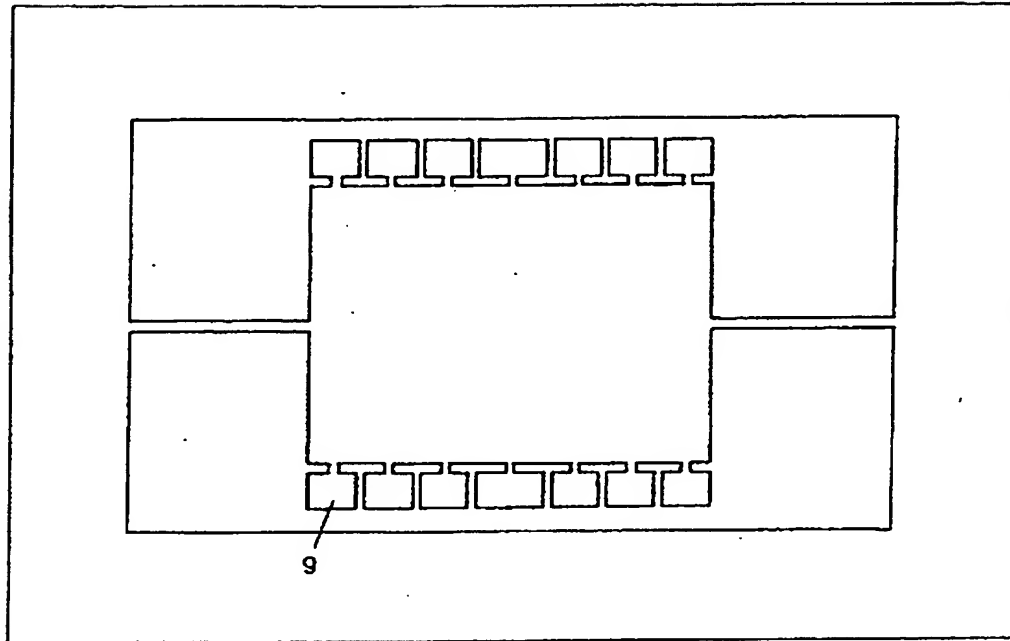


Fig. 5

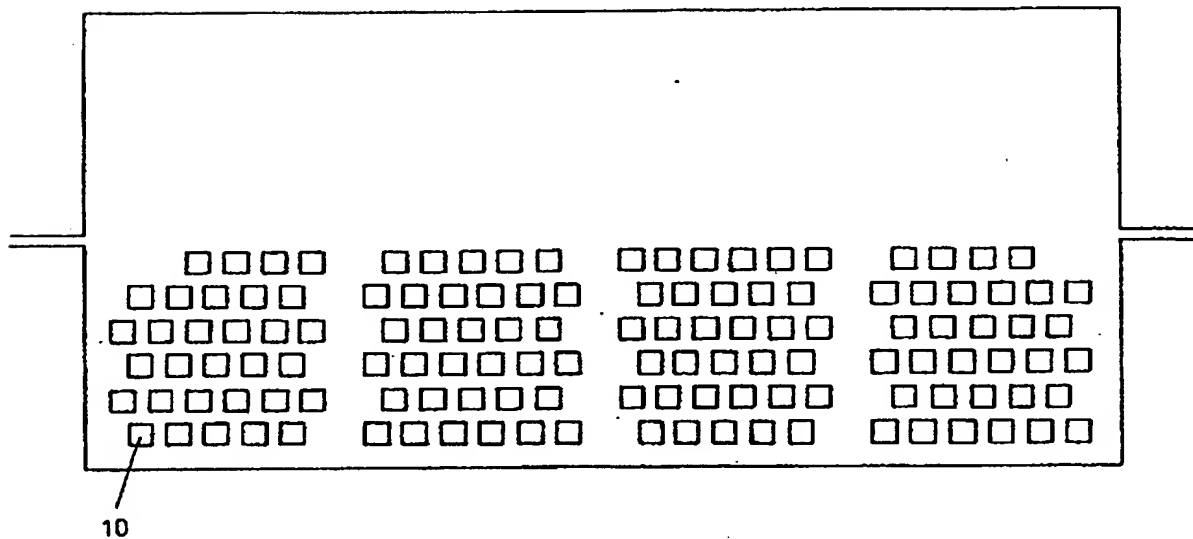


Fig. 6

208 067/16

(12) Published Patent Application

(10) DE 4126 100 A1

(21) Application No. P 41 26 100.3

(22) Filing date: 7/8/91

(43) Date of publication: 18/2/93

(71) Applicant:

Technische Universität Chemnitz, O-9010 Chemnitz,  
DE

(72) Inventors:

Schäfer, Andre, Dipl.-Ing., O-9051 Chemnitz, DE;

Markert, Joachim, Dr.-Ing., O-9044 Chemnitz, DE;

Rauch, Manfred, Prof. Dr.-Ing. habil., O-9081 Chemnitz, DE;

Breng, Uwe, Dipl.-Ing., O-9075 Chemnitz, DE

(54) Micromechanical Gyrometer

(57) The invention relates to a capacitive gyrometer produced by using micromechanica manufacturing technology, which is used for transforming acceleration acting upon it into electrical signals. In addition to conventional use in mechanical engineering, areas of application include especially automobile technology and low-cost applications in appliance technology or concerning household appliances. The invention has the basic task of creating a simple

micromechanical gyrometer, with a differential capacitor system, which, in the case of acceleration being effected, however in any direction, allows for a torsional movement with mechanical damping designed with favorable dynamic characteristics and only for a negligibly small bending. According to the invention, the torsional pendulum, which consists of a rotary plate (1) having an electrode surface (5) between two torsional spring strips (4), is additionally supported by means of at least two knife-edge bearings, whereby the rotary plate (1) possesses an opening (8), which has a damping-reducing effect and at the same time offsets the center of mass. The rotary plate (1) is also provided with removable mass members (9).

## Description

The invention relates to a capacitive gyrometer, produced by using micromechanical manufacturing technology, which is used for transforming acceleration acting upon it into electrical signals. It can be used primarily in applications where accelerations in devices and systems must be determined and control functions must be derived therefrom.

Acceleration sensors are suitable for movement analysis in various fields. Sensors that are manufactured micromechanically have the advantage of having small dimensions and, in the case of corresponding quantities, lower costs. In addition to conventional use in mechanical engineering, areas of application include automobile technology and low-cost applications in appliance technology or concerning household appliances.

In GB 21 01 336 A a micromechanical acceleration sensor compensated by force is suggested, which works with capacitive signal transformation. The differential capacitor system used for this purpose is implemented to the extent that an electrode is attached to each of the upper and lower surfaces of a torsion member moveable around a

lateral axis. These electrodes are mounted opposite to fixed electrodes connected to the frame (above or below the torsion member).

A further development of this arrangement is disclosed in DE 38 24 695, in which both movable electrodes are positioned under the torsion member, which is designed as a torsional pendulum. Such an arrangement is actually very easy to manufacture, from a technical point of view, and the gaps between the electrodes of the two partial capacitances of the differential capacitor are created in the same procedural step. However, because of the considerable bending of the torsional axis along its entire length which occurs, besides the torsion, when acceleration is effected, the alteration in the gap between the electrodes in the opposite direction is not by the same amount. This is thus not a genuine differential capacitor. There is no statement about the cross-sectional configuration of the torsion strips, which is important for the flexural rigidity. The embodiment referred to indicates an extremely flat cross-section, resulting in a particularly high susceptibility to bending, which aggravates the aforementioned problems. The modification of the embodiment with an additional mass does actually permit a variation of the torsional member thickness, but would require the use of the relatively

expensive epitaxy process.

EP 00 40 302 discloses a torsional actuator for beam deflection, which is also designed as a torsional pendulum. The gap between the torsional pendulum and the fixed electrodes of the base plate is kept in place by means a supporting surface under the torsional axis. The embodiment shows several long, narrow supporting surfaces obtained by etching the base plate, which are positioned behind one another in the torsional axis. There is no disclosure of how the precise shaping of the supporting surfaces is achieved. The bending in the torsional axis, which also occurs in the torsional actuator - in this case due to force of the electrical field - and the beam deflection error caused by this bending are actually prevented by the arrangement, but, for the adjustment of the base plate and torsional pendulum at right angles to the torsional axis, there are very stringent requirements, which complicate the assembly.

The problem of air damping becomes more and more important with the increasing miniaturization of motion sensors. In order to maintain a high sensitivity of the sensor, the basic gap between the electrodes must be as small as possible, so that the alteration in the gap between the

electrodes caused by motion results in a greater change in capacitance. For an electrostatically regenerative sensor, the gap between the electrodes is a square power function of the reaction force. There are various remedies against the excessive damping and the associated unfavorable dynamic characteristics.

In the journal "Sensors & Actuators" 4 (1984) p. 191, an evacuation of the sensor is given as a possible solution. This method is, however, technologically complex and often the impermeability of the sensor can only be guaranteed for a certain time period.

At the EUROSENSORS Conference IV 1990 P.2.1.1, a micromechanical acceleration sensor was disclosed, in which the excessive damping is mitigated by means of grooves in the seismic mass. The grooves extend over the entire plate surface, parallel to the vanes that are suspended on one side. With this counter-damping measure, the capacitance change decreases substantially, by approximately the amount which goes down through the groove from the entire surface.

In the torsional pendulum disclosed in DE 38 24 695, both partial capacitances of the differential capacitor are arranged side by side, whereby the ratio of the electrode



gap to the electrode surface area, which is important for damping, is very small. The situation is aggravated by the fact that the gap decrease in one variable capacitor wing is inevitably associated with a gap increase in the other variable capacitor wing. The patent does not disclose any measures aimed at reducing the damping.

The invention has the task of creating a simple micromechanical gyrometer with a differential capacitor system, which, in the case of acceleration being effected, however in any direction, allows for a torsional movement with mechanical damping designed with favorable dynamic characteristics and only for a negligibly small bending.

This task is solved with a generically defined device by using the characterizing features of Claim 1.

In the gyrometer according to the invention, the torsion member is designed as a torsional pendulum (a rotary plate with two rotary plate wings between two torsion spring strips). In addition to the fixed clamping of the torsion spring strips, the rotary plate is fixed in its vertical (and, to a certain extent, horizontal) position by means of two or more, for example four, knife-edge bearings, which consist of knife edges on the upper or lower surface of the

torsion spring strips and ribs acting as sockets, so that there is practically only one degree of freedom left. The bending deflection is also reduced by making the torsion spring strips with a triangular or diamond-shaped cross-section.

The first part of the characterizing part of the main claim refers to an arrangement with two knife-edge bearings (one for each torsion spring strip), whereby, in order to solve the task of the invention, an electric voltage is necessary between the electrode surfaces, with the resulting attractive force. In the gyrometer according to the invention, the solution is provided by using electrostatic force compensation with a bias voltage superimposed on the compensation voltage, ensuring the continuous attraction effect (see, for example, Technisches Messen 56(1989) Issue 2, p. 93-98). This arrangement facilitates calibration and assembly.

The second part of the characterizing part of the main claim refers to an arrangement with four knife-edge bearings (two for each torsion spring strip), which ensure complete vertical stability of the torsion spring strips, also without adjacent voltage application, if an ideal arrangement of the knife-edge bearings is assumed. This is

not possible in practice. However, the sockets of each torsion spring strip can be horizontally staggered, whereby the knife-edge bearings can also be staggered with respect to each other. This enlarges the vertical tolerance upon assembly of the middle plate and cover plate. More specifically, a little bending in the torsion spring strips occurs as a consequence of the "clamped support" without causing a change in the mechanical characteristics of the entire system, thus any vertical slackness at the support points can be ruled out. On the other hand, the possibility exists to change the mechanical properties of the entire system by means of a stronger positive bending of the torsion spring strips.

The torsional movement caused by the effect of the rotary acceleration is determined by means of the differential capacitor system as described in Sensors & Actuators A21-A23 (1990), p. 297-302, or the electrostatic force is compensated for as described in Technisches Messen 56(1989)2, p. 93-98. The measurement signal accuracy is enhanced because of the reduction in bending.

The dependent claims define advantageous development of the invention.

Claim 2 suggests making one or more openings in the rotary plate in the area within and around the supported torsional axis, with the aim of reducing the mechanical damping. The electrode surface that is thus lost is located in an area where, under the effect of acceleration, only small capacitance change occurs, or zero capacitance change in the case of the supported torsional axis. The remaining electrode surface is located at a large distance from the supported torsional axis, where, as a result of the damping reduction measures, a major part of the change in capacitance (measurement signal) occurs. The substantial air friction determining the damping only still occurs, however, under one of the rotary wings.

The invention combines the damping reduction measures in accordance with Claim 2 with the offset of the center of mass that is required for the functioning of the acceleration sensor. In order to do this, one or more openings are made in the rotary plate, asymmetrical with respect to the supported torsional axis. The largest offset of the center of mass is obtained when the opening(s) extend on only one side of the supported torsional axis, starting from one of the rotary plate wings.

Claim 3 refers to the position of the sockets chosen during

the assembly, and Claim 4 deals with the vertical adjustment of the sockets that is made voluntarily during use. This allows for new voluntarily adjustable characteristics to be established. The various possible positions are shown in Table 1.

Embodiments of the micromechanical gyrometer are shown in the accompanying drawings, in which:

Fig. 1 is a general view of a gyrometer (without a cover plate).

Fig. 2a is a longitudinal section view taken along line A-A of the gyrometer, without a cover plate and with two knife-edge bearings.

Fig. 2b is a longitudinal section view taken along line B-B of the gyrometer with a cover plate and four knife-edge bearings.

Figs. 3a-c show cross-sectional views of the torsion spring strips of the gyrometer.

Fig. 4 shows middle and cover plate design for providing a choice of the knife-edge bearing vertical position.

Fig. 5 shows a mask layout for a torsional pendulum with removable mass members.

Fig. 6 shows a mask layout for a torsional pendulum with structured rotary plate wings (sectional view).

The torsional member or torsional pendulum (consisting of the rotary plate 1, which is divided into two rotary plate wings 2 and 3, suspended between two torsional spring strips 4) is etched out in a silicon chip that forms a middle plate 12. The cover plate 13 (if applicable) is also made out of silicon, whereas the base plate 11 can be manufactured from glass or silicon. To define the cross-section of the torsion spring strips 4, contractions are provided by use of silicon microsystem technology. Thus, the anisotropic etching is used to obtain (111) facets, which are positioned at the characteristic angle of  $54.74^\circ$  with respect to the wafer surface, from which the height-to-width ratio for the triangular or diamond-shaped cross-section is obtained (Figs. 3a, 3b). The above-mentioned cross-sectional configurations represent an attempt to approximate ideal shapes that cannot fully be achieved when the masking technique is used, with the resulting minimum width of the mask pillars. A surface 16 parallel to the wafer surface still remains. The

triangular cross-section can be reduced to a V-shaped cross-section in accordance with Fig. 3c. This changes the torsion-to-bending ratio.

The opening 8 in the rotary plate 1 is provided, as shown in Fig. 1, in only one rotary plate wing, on one side of the torsional axis. This permits the largest offset of the center of mass to be achieved. However, since this opening leads to a too large reduction in the electrode surface area for the required symmetry of the electrode surfaces 5 on the two rotary plate wings, a compromise can be found. This compromise is found by the opening 8 still being asymmetrical to the supported torsional axis, however extending over the two rotary plate wings 2 and 3. This reduces the center of mass offset, but the electrode surface 5 is increased.

Fig. 4 shows a base plate 11, middle plate 12, and also the cover plate 13, prior to assembly. The arrangement shows the ribs 6 in the base plate 11 and ribs 7 in the cover plate 13 for defining four knife-edge bearings. The edge zone of the middle plate 12 possesses extensive recesses 14, and the raised portions 15 in the cover plate 13, the depth or height of which is determined by means of two discrete vertical sockets in the two assembly positions (Fig. 4).

This arrangement allows for being combined with the expanding members suggested in Claim 4. Likewise, only an embodiment of the ribs 7 in the cover plate 13 can be used as the expanding members, without the arrangement described in Claim 3 being used.

By the targeted removal of the mass members 9 (Fig. 5) in the remaining combination, the center of mass can be adjusted within a broad range with corresponding graduation. The removal could be carried out, for example, by using a laser or mechanical device.

The square pits 10 in the rotary plate 1 (Fig. 6) are based on self-stop. They leave intact the electrode that is located on the underside. The maximum side length of the square pits 10 depends on the thickness of the rotary plate 1, the required residual thickness in the pit base and the required mask pillar width.

Any combination of individual measures aimed at offsetting the center of mass can be used.

Reference numerals used:

1 Rotary plate



- 2 Rotary plate wing
- 3 Rotary plate wing
- 4 Torsional spring strip
- 5 Electrode surfaces
- 6 Base plate ribs
- 7 Cover plate ribs
- 8 Opening
- 9 Mass members
- 10 Pit
- 11 Base plate
- 12 Middle plate
- 13 Cover plate
- 14 Extensive recesses
- 15 Raised portions
- 16 Surface parallel to wafer surface

Variable vertical position of the spring strip sockets with respect to each other		Horizontal position of the spring strip sockets with respect to each other defined by a template			
		$a = 0$	$0 < a < \frac{l-b}{2}$	$a = \frac{l-b}{2}$	$\frac{l-b}{2} < a < l-b$ <sup>1)</sup>
	Slackness	Electrical voltage (attraction force) between electrodes is required to rule out any bending in one direction during acceleration in one direction and in any direction			
	Mech. strain	Not assemblable	Bruchspannung	Vertical assembly tolerance Change in entire system mechanical properties	Bruchspannung Si

1) Refer to Fig. 2 for notations

Table 1

Si breakthrough voltage

## Patent Claims

1. A micromechanical gyrometer in a sandwich construction, having a torsional pendulum in the silicon middle plate, consisting of electrode surfaces of the same size, symmetrical with respect to the torsional axis, which are attached to the rotary plate, as well as fixed counter-electrodes on a base plate, which is fixed to the middle plate and the cover plate (if applicable), whereby a force compensation is possible for the electrodes of the differential capacitor system and the torsional axis runs well beyond the center of mass, but within the torsion member, characterized by the fact that the torsional pendulum, which consists of the rotary plate (1) with two rotary plate wings (2, 3) between two torsion spring strips (4), is supported in the axis from clamp to clamp by means of at least 2 knife-edge bearings, whereby, under each of the two torsion spring strips (4), a first knife-edge bearing is located as near as possible to the rotary plate (1) and symmetrical to it on both sides, and the knife-edge bearing from the ribs (6) is formed on the base plate (11) and the torsion spring strips (4), whereby the cross-section of the torsion spring strips (4) comes as close as possible to the form of a triangle, and that there is a permanent electrical voltage between the

electrodes of the rotary plate wings and their counter-electrodes, or that the torsional pendulum is supported in the axis from clamp to clamp by means of at least four knife-edge bearings, whereby underneath and above the torsion spring strips (4), each time symmetrical to the rotary plate on both sides, there is at least one knife-edge bearing and the cross-section of the torsion spring strips (4) approaches a diamond shape, whereby the first knife-edge bearings are positioned as closely as possible to the rotary plate (1) and are formed from the ribs (6) in the base plate (11) and the torsion spring strips (4), and the second knife-edge bearings are formed from the ribs (7) in the cover plate (13) and the torsion spring strips (4), with the ribs (6) in the base plate (11) and the ribs (7) in the cover plate (13) being staggered with respect to one another or being positioned opposite to one another.

2. The micromechanical gyrometer in accordance with Claim 1, characterized by the fact that the rotary plate (1) possesses at least one opening (8) in its centre in the area within and around the supported torsional axis, for the purpose of reducing the mechanical damping, whereby the opening (8) is situated asymmetrically with respect to the supported torsional axis in order to offset the center of

mass.

3. The micromechanical gyrometer in accordance with Claim 1, characterized by the fact

that, in order to allow for adjustment of the positions of the knife-edge bearings which are formed from the ribs (7) in the cover plate (13) and the torsion spring strips (4), the middle plate (12) possesses, in its boundary zone, surfaces of varying heights, which are formed as extensive recesses (14), and

that the cover plate (13), in its boundary zone, possesses correspondingly raised surfaces (15), and

the extensive recesses (14) in the middle plate (12) and the raised surfaces (15) in the cover plate (13), which correspond to one other in size and position, are combined and are connected at the contact points, or that the cover plate (13) is designed to be rotated through  $180^\circ$  on the wafer plane with respect to the middle plate (12).

4. The micromechanical gyrometer in accordance with Claim 1, characterized by the fact that, in order to allow for adjustment during use, a thermal expanding member (or one in accordance with another principle) is located in the cover plate (13) or in the base plate (11), whereby the ribs (7) in the cover plate (13) are preferably designed as expanding

members.

5. The micromechanical gyrometer in accordance with Claim 1, characterized by the fact that mass members (9) of the same or different sizes are located along the edge of the rotary plate (1), preferably symmetrically to the supported torsional axis, which are removed mainly on one side in order to offset the center of mass of the rotary plate (1).

6. The micromechanical gyrometer in accordance with Claim 1, characterized by the fact that, in order to offset the center of mass in at least one of the rotary plate wings (2, 3), a material of a different thickness to silicon is put in or on.

7. The micromechanical gyrometer in accordance with Claim 1, characterized by the fact that, in order to offset the center of gravity, one rotary plate wing possesses a structure in the form of several pits (10) arranged in accordance with a particular model, whereby this structure is preferably in the form of square outline pits (10) staggered with respect to each other, confined to larger, also square, unstructured areas, which are designed to ensure mechanical stability.

**DE 41 26 100 A1**

- 21 -

4 pages of drawings attached

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**